

VU Research Portal

Economie van klimaatverandering en natuurrampen

Botzen, W.J.W.

2017

document version

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

citation for published version (APA)

Botzen, W. J. W. (2017). *Economie van klimaatverandering en natuurrampen*. VU.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mail address:

vuresearchportal.ub@vu.nl

prof.dr. W.J.Wouter Botzen

Economie van klimaatverandering en natuurrampen

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar
Economics of Climate Change and Natural Disasters,
aan de Faculteit der Bètawetenschappen van de Vrije Universiteit Amsterdam
op 15 december 2017.

Economie van klimaatverandering en natuurrampen

Mijnheer de rector magnificus, collega's, gewaardeerde toehoorders, familie en vrienden,

Regelmatig wordt u via media geconfronteerd met het thema van deze lezing en de titel van mijn leerstoel, Economie van klimaatverandering en natuurrampen. 2017 gaat de boeken in als een jaar met veel menselijk leed, veroorzaakt door natuurgeweld. Orkanen als Harvey, Irma, Maria en Nate hebben het Caribisch gebied en de Amerikaanse Oostkust ernstig getroffen. De vier orkanen die dit jaar het vasteland van de Verenigde Staten hebben geteisterd, evenaren het destructieve orkanenseizoen uit 2005 met onder andere orkaan Katrina. Deze afbeelding van orkaan Harvey, afkomstig van het internationale ruimtestation, toont de omvang van de storm.



Deze vormen van extreem weer hebben lokaal grote maatschappelijke gevolgen. Orkaan Harvey heeft bijvoorbeeld geleid tot een record hoeveelheid neerslag en overstromingen in Texas, waaronder in het economische hart van Houston, zoals deze foto's illustreren (National Weather Service, 2017). Dergelijke overstromingen maken niet alleen slachtoffers, maar schaden ook de economie.



Wind en water veroorzaken directe schade aan huizen en inboedel en aan de publieke infrastructuur, zoals wegen. Bedrijven ervaren ook directe schade aan gebouwen, productietechnologieën en voorraden. Tevens vinden in de loop der tijd processen plaats die indirecte economische schade teweegbrengen (Okuyama, 2007; Okuyama en Santos, 2014). Bedrijven zijn bijvoorbeeld gesloten tijdens evacuaties voor de ramp en kunnen productieprocessen pas hervatten nadat de schade is hersteld en werknemers weer in staat zijn om de vestiging(en) te bereiken. Het tijdelijk wegvallen van de infrastructuur, zoals elektriciteits- en watervoorziening, en van transport door afsluiting van vliegvelden en havens, bemoeilijkt dit proces (Rose en Liao, 2005; Rose et al., 2016). De haven in Houston, een cruciaal handelsknooppunt, is bijvoorbeeld een week gesloten geweest vanwege orkaan Harvey. Een functionerende markteconomie kan deze indirecte schade deels beperken wanneer de productie elders wordt voortgezet. Bedrijven buiten het rampgebied nemen dan een deel van de weggevallen productie over en kunnen hier economisch van profiteren (Carrera et al., 2015).

De totale economische schade van de orkanen in 2017 is nog niet precies vast te stellen. De eerste schattingen van de EM-DAT-database van rampschades tonen aan dat de schade door orkaan Harvey voor enkel de Verenigde Staten al 58 miljard dollar bedraagt. De totale schade van de verschillende orkanen voor alle getroffen gebieden valt naar verwachting nog hoger uit. De economische effecten op de lange termijn kunnen verschillen per gebied. Veel huishoudens en bedrijven in de Verenigde Staten zijn tegen de schade verzekerd en de federale overheid vergoedt deels de overige schade. Dit bevordert het herstelproces. De veerkrachtige en diverse Amerikaanse economie maakt het bovendien mogelijk om de macro-economische schokken op te vangen (Rose en Wei, 2013).

Dit kan anders uitvallen voor de getroffen landen in het Caribisch gebied. Op Sint-Maarten is men bijvoorbeeld grotendeels niet verzekerd tegen de schade die de orkaan Irma heeft veroorzaakt.

Hierdoor is het eiland afhankelijk van internationale financiële hulp. De economie op Sint-Maarten is voornamelijk afhankelijk van de toerismesector, die ernstig getroffen is. Tevens belemmeren tekortkomingen in het lokale bestuur en instituties een effectieve en spoedige wederopbouw.

Deze voorbeelden raken aan verschillende onderzoeksvragen die ik wil beantwoorden in mijn leeropdracht Economie van klimaatverandering en natuurrampen:

- Hoe kunnen methodes, die kennis van klimaat en economische systemen integreren, worden verbeterd om inzicht te verschaffen in de klimaat- en natuurramp risico's, met het doel richting te geven aan beleid om klimaatverandering te voorkomen en de economische gevolgen te beperken?
- Hoe kunnen de huidige risico's en toekomstige ontwikkelingen in risico's van natuurrampen beter worden geschat, rekening houdend met de besluitvorming omtrent de voorbereidingen op rampen?
- Hoe kunnen we ervoor zorgen dat mensen zich voldoende voorbereiden op natuurrampen en welke bijdrage kunnen financiële prikkels hieraan leveren?
- Welke verzekeringsvormen dragen bij aan een brede, economisch efficiënte en betaalbare dekking van natuurramp risico's voor consumenten?

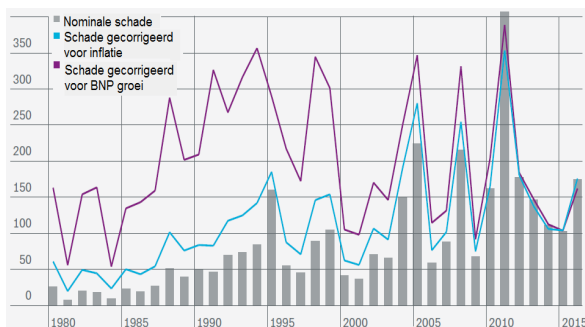
Dit zijn lastig te beantwoorden vragen die vaak vanuit verschillende monodisciplines worden bestudeerd, maar die naar mijn mening een meer integrale en interdisciplinaire aanpak behoeven. Mijn onderzoek benadert deze vraagstukken vanuit een economische invalshoek en houdt rekening met inzichten uit andere disciplines, waaronder klimaatwetenschappen, hydrologie, geografie, bestuurskunde en psychologie.

In deze rede schets ik eerst de problematiek om vervolgens dieper in te gaan op de vier centrale vragen.

Natuurrampschades uit het verleden en klimaatverandering

De vraag of hevige natuurrampen, zoals die van afgelopen jaar, door klimaatverandering worden veroorzaakt wordt regelmatig gesteld. Extreem weer is echter van alle tijden en orkanen kunnen ook plaatsvinden zonder veranderingen in het klimaat. Toch worden orkanen naar verwachting heviger en frequenter door de opwarming van de aarde (IPCC, 2013). Een zware stormvloed kan bijvoorbeeld ook meer land onder water zetten wanneer zeespiegelstijging het zeeniveau heeft verhoogd (Nicholls en Cazenave, 2010).

Schades door natuurrampen worden echter vooral berokkend door de mensen en economische activiteiten in de gebieden die hierdoor getroffen kunnen worden. Deze grafiek illustreert de invloed van economische groei op natuurrampschades (Figuur 1). Hierin zijn wereldwijde schades van grote natuurrampen tussen 1980 en 2016 in miljarden Amerikaanse dollars weergegeven (Munich Re, 2017). De grijze balken geven de nominale schade per jaar weer. Deze varieert per jaar maar bevat een statistisch significante stijgende trend. Sinds 2010 bedraagt de nominale schade elk jaar meer dan 100 miljard dollar. De blauwe curve toont de historische schades die zijn gecorrigeerd voor inflatie en uitgedrukt in het prijspeil van 2016. De positieve trend blijft bestaan. Wanneer de schades worden genormaliseerd voor een factor van de lokale verandering in het inkomen, zoals de paarse lijn aangeeft, verdwijnt de trend. Natuurrampen uit het verleden hebben vergelijkbare schades teweeggebracht als de natuurrampen in het heden met de huidige economische blootstelling. Een algemene conclusie van verschillende studies naar trends in deze historische natuurrampschades is dat, na een correctie voor bevolkingsgroei en economische groei, hierin geen duidelijke trend waarneembaar is die aan de klimaatverandering kan worden toegeschreven (IPCC, 2012).



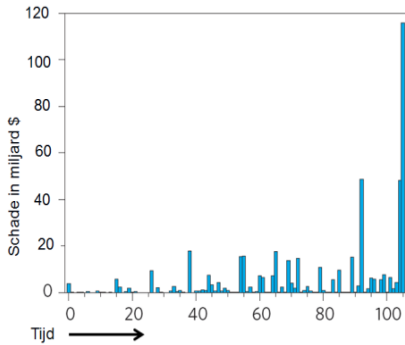
Figuur 1. Wereldwijde schades van grote natuurrampen tussen 1980 en 2016 in miljarden Amerikaanse dollars (Munich Re, 2017).

Deze afbeelding en deze normalisatiemethode van geaggregeerde schadedata kunnen echter een vertekend beeld geven. Dit zijn geaggregeerde gegevens van verschillende vormen van natuurgevaren, zoals overstromingen, stormen, aardbevingen, tsunami's en hagelbuien, die lokaal, in verschillende gebieden van de wereld schade hebben veroorzaakt. Natuurrampschades ontstaan door een combinatie van kenmerken van het lokale natuurgevaar, de lokale economische blootstelling en de kwetsbaarheid daarvan. Die kwetsbaarheid hangt ook samen met lokale preventie- en voorbereidingsmaatregelen. Trends in deze factoren die tot economische schades leiden verschillen per locatie en dienen dan ook vooral op lokale schaal te worden bestudeerd. Zo wordt voorkomen dat men te veel informatie generaliseert, waardoor de nuances verdwijnen.

Naar trends in schades per land of per regio veroorzaakt door een specifiek natuurgevaar, zoals overstromingen, zijn verschillende onderzoeken verricht. Op enkele uitzonderingen na tonen deze studies aan dat niet kan worden vastgesteld dat klimaatverandering de schade significant beïnvloedt. Een artikel van Bouwer (2011) beschrijft bijvoorbeeld 21 studies over dit onderwerp, waarbij 13 studies geen trend en 8 studies wel een trend aantonen in schade die met klimaatverandering kan samenhangen. Veel van de gebruikte tijdreeksen van schade zijn echter te kort om daarmee langetermijntrends te onderzoeken.

Dat een empirische statistische benadering tot andere resultaten kan leiden blijkt uit een studie waaraan ik met collega's Francisco Estrada en Richard Tol heb gewerkt (Estrada et al., 2015). Deze studie betreft een analyse van schadegegevens van orkanen in de Verenigde Staten. De eerste gegevens dateren uit 1900 en de laatste uit 2005. De recente orkaanschades zijn hierin dus niet verwerkt. Hoewel het in de literatuur gebruikelijk is om een normalisatieprocedure toe te passen, die schades in verschillende jaren corrigeert op basis van aannames over veranderingen in economische blootstelling (Pielke et al., 2008), zijn in dit artikel statistische methodes toegepast die de relaties tussen orkaanschades en de lokale blootstelling schatten op basis van empirische gegevens. Aan de hand van deze geschatte relaties kan vervolgens de orkaanschade binnen dit tijdsbestek worden genormaliseerd voor de veranderingen in bevolking en economische waarden. De resultaten daarvan staan in deze grafiek (Figuur 2). Deze geeft de ontwikkeling in orkaanschade vanaf het eerste meetpunt in dit tijdsbestek weer in tientallen miljarden dollars. De schade vertoont verschillende pieken. Ook na normalisatie voor economische groei en bevolkingsgroei blijft een trend zichtbaar in de schadegegevens. Verschillende statistische analyses die in deze studie gerapporteerd zijn, tonen aan dat deze trend consistent is met een toename in temperatuur en orkaanactiviteit. Hoewel deze schade vooral beïnvloed wordt door de groei van bevolking en economie, duiden onze resultaten op een signaal van klimaatverandering in de historische schadeontwikkeling. Ik ben van mening dat meerdere van deze lokale statistische studies vereist zijn om de oorzaken van de toename in natuurrampschades beter te begrijpen. Daarnaast veronderstel ik ook dat dit type onderzoek een aantal

fundamentele beperkingen kent. Natuurrampen komen niet vaak voor op een landelijk of regionaal niveau, waardoor voor veel gebieden onvoldoende datapunten beschikbaar zijn voor analyses.



Figuur 2. Genormaliseerde orkaanschade in de Verenigde Staten tussen 1900 en 2005 (Estrada et al., 2015).

Tot nu toe heb ik voornamelijk gesproken over de invloed van indicatoren van klimaat of van economische blootstelling op de schade, waarvan redelijke en meer nauwkeurige gegevens beschikbaar zijn. Maar de kwetsbaarheid van bijvoorbeeld gebouwen en economische activiteiten heeft ook een belangrijke invloed op schade. Deze kwetsbaarheid wordt ook wel gerelateerd aan de veerkracht van de maatschappij tegen schokken. Systematische gegevens hiervan uit een langere periode zijn nauwelijks beschikbaar, waardoor deze factoren vaak achterwege blijven in empirische studies. Dit bemoeilijkt niet alleen analyses van trends, maar beperkt ook de mogelijkheden om te leren over factoren die de schade beperken, terwijl deze juist relevant zijn voor beleidsmakers. Verder onderzoek moet dus meer aandacht besteden aan kwetsbaarheid.

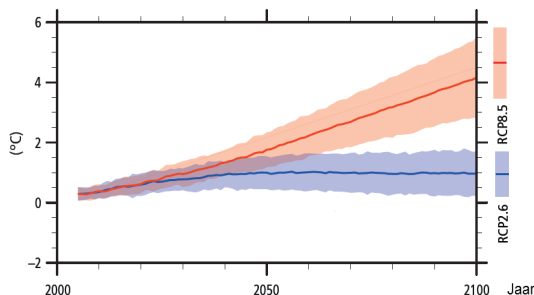
Een andere beperking van dit type onderzoek is dat de consequenties van natuurrampen uit het verleden niet representatief zijn voor die in de toekomst, vanwege een veranderend klimaat en een continu veranderende maatschappij.

Met de beperkingen van analyses van historische natuurrampschades in aanmerking genomen, hebben wetenschappers modellen ontwikkeld waarmee verschillende mogelijke natuurgevaren, en de directe schades en indirecte economische gevolgen die deze met zich meebrengen, worden gesimuleerd. Ik zal later bespreken hoe deze modellen kunnen worden toegepast om huidige en toekomstige veranderingen in risico's beter te begrijpen en om de effectiviteit van beleidsmaatregelen, die het risico verlagen, te evalueren. Eerst wil ik dieper ingaan op de klimaatproblematiek.

Toekomstige effecten van klimaatverandering

Met het oog op de toekomst wordt verwacht dat de uitstoot van broeikasgassen in de atmosfeer grote veranderingen in ons klimaat zal veroorzaken. Deze verwachtingen zijn beschreven in het vijfde assessmentrapport van het IPCC, het klimaatpanel van de Verenigde Naties (IPCC, 2014). Daaruit blijkt dat de opwarming van het klimaatsysteem onomstotelijk is en dat de meeste waargenomen veranderingen sinds 1950 voor decennia of zelfs duizenden jaren lang niet zijn voorgekomen. De atmosfeer en oceanen zijn opgewarmd, hoeveelheden sneeuw en ijs zijn afgenomen en de zeespiegel is gestegen. De gemiddelde temperatuur op aarde neemt verder toe. Dat geeft deze grafiek weer op basis van het RCP8.5 scenario van broeikasgasemissies, voor een groeiende wereldeconomie die afhankelijk blijft van fossiele brandstoffen (Figuur 3). Aan het eind van deze eeuw is het volgens deze grafiek gemiddeld ongeveer 3,7 tot mogelijk bijna 5 graden Celsius warmer. Deze temperatuurstijging

kan deels worden vermeden wanneer wereldwijd de broeikasgasemissies sterk worden teruggedrongen. De blauwe lijn geeft dit aan. In dit RCP2.6 scenario blijft de temperatuurstijging beperkt tot 2 graden Celsius.



Figuur 3. Verwachte temperatuurstijging door klimaatverandering volgens de RCP2.6 en RCP8.5 scenario's van broeikasgasemissies (IPCC, 2014).

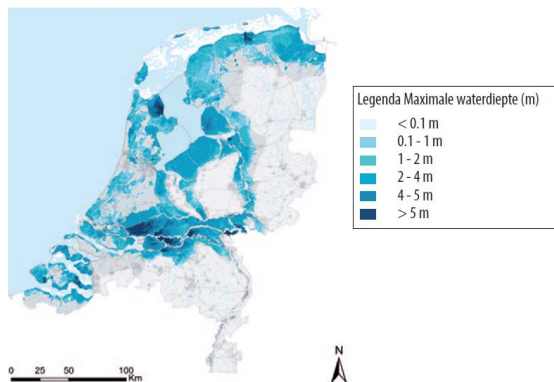
Het internationale klimaatakkoord van 2015 in Parijs heeft als doel de opwarming tot maximaal 2 graden Celsius te beperken. Dit beoogde resultaat is niet gegarandeerd, want het is afhankelijk van de vrijwillige toezeggingen van landen om broeikasgasemissies te reduceren. Verschillende studies tonen aan dat deze vrijwillige toezeggingen onvoldoende zijn, vooral wanneer deze in de toekomst niet worden aangescherpt (Rogelj et al., 2016; Peters et al., 2017). Tevens kan een verschuiving van emissies van landen met streng naar die met zwak beleid de effectiviteit van de doelen ondergraven. De kans op het behalen van de doelen van het Parijse akkoord is verminderd doordat de Verenigde Staten heeft besloten zich hieraan te onttrekken (Sanderson en Knutti, 2017). Volgens een recent rapport van de Wereld Meteorologische Organisatie zijn de concentraties van broeikasgassen vorig jaar wederom verder gestegen (WMO, 2017). Het is van belang de risico's van klimaatverandering in kaart te brengen en hierop te anticiperen, onder andere omdat emissies uit het verleden van invloed zijn op het toekomstige klimaat (Mauritsen en Pincus, 2017).

Klimaatverandering heeft niet alleen invloed op de gemiddelde temperatuur op aarde. Met name van belang zijn de veranderingen in weersextremen die omvangrijke gevolgen voor onze maatschappij kunnen hebben. Deze tabel is gebaseerd op de IPCC-rapporten (2012; 2013) en geeft voor een aantal weersextremen de waarschijnlijkheid van een verwachte toename aan het eind van deze eeuw weer (Tabel 1). Door zeespiegelstijging is het zeer waarschijnlijk dat extreem hoge zeeniveaus vaker voorkomen. Orkanen worden waarschijnlijk heviger. Het is zeer waarschijnlijk dat extreme neerslag intensiever wordt en vaker voorkomt in verschillende regio's. Tevens komen hittegolven vaker voor en duren deze langer. Periodes van droogte zullen ook frequenter voorkomen en persistenter zijn. Dit zijn verwachtingen in de globale trends. Deze kunnen regionaal verschillen.

Tabel 1. Waarschijnlijkheid van een verwachte toename in weersextremen door klimaatverandering (IPCC, 2012; 2013).

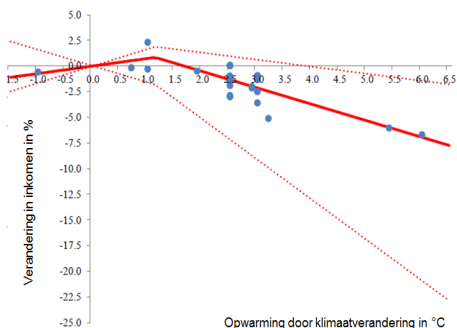
Weersextrem	Zekerheid toekomstige toename
Extreem hoog zeeniveau	Zeer waarschijnlijk
Intensiteit orkanen	Waarschijnlijk
Extreme neerslag	Zeer waarschijnlijk
Duur en frequentie droogte	Waarschijnlijk
Duur en frequentie hittegolven	Zeer waarschijnlijk

Deze verwachte toenames in weerrisico's zijn uitermate relevant voor Nederland. Door de laaggelegen delta bestaat Nederland grotendeels uit potentieel overstrombaar gebied dat kwetsbaar is voor meer extreme neerslag, hogere piekafvoeren in rivieren en zeespiegelstijging. Deze kaart illustreert dit (Figuur 4). Aanpassen aan klimaatverandering betekent dat Nederland ondanks zijn degelijke dijkinfrastructuur extra moet investeren in de preventie van overstromingen en in maatregelen die de gevolgen beperken. De Tweede Deltacommissie, die de overheid heeft geadviseerd over overstromingsrisicomanagement, erkent dit ook (Deltacommissie, 2008).



Figuur 4. Potentieel overstrombaar gebied in Nederland (Leenders et al., 2015).

Ik heb tot nu toe de invloed van klimaatverandering op natuurrampen en de hieraan gerelateerde economische schade behandeld, maar de economische gevolgen van klimaatverandering zijn breder. Milieueconomen hebben deze gevolgen in kaart gebracht middels geïntegreerde klimaat-economiemodellen. Deze modellen schatten de totale economische welvaartseffecten van verschillende niveaus van temperatuurstijging als percentage van het inkomen. Richard Tol (2017) heeft 27 van zulke schattingen samengevat in deze grafiek (Figuur 5). De donkerrode curve toont de meest waarschijnlijke relatie tussen de opwarming en de economische gevolgen aan, en de stippellijnen geven het 95 procentzekerheidsinterval weer. Hoewel elke studie een eigen aanpak kent, illustreren deze schattingen over het algemeen de economische consequenties van klimaatverandering op de volgende terreinen: productiviteit van de agrarische sector, bosbouw, industrie, energiegebruik, gezondheidsrisico's, de recreatie- en toerismesector, kustgebieden, ecosystemen en de daaraan gerelateerde economische gevolgen, en een deel van de risico's van extreem weer (van den Bergh en Botzen, 2015).



Figuur 5. Verwachte economische gevolgen van klimaatverandering (Tol, 2017).

Een beperkte opwarming kan netto baten hebben, bijvoorbeeld door een toename in productiviteit in de agrarische sector in sommige regio's. Toch domineren negatieve economische gevolgen bij de hogere temperatuurstijgingen, zoals het IPCC voorspelt. Het valt op dat de onzekerheid in deze schattingen omvangrijk is. Een opwarming van rond de 3,5 graden Celsius leidt bijvoorbeeld waarschijnlijk tot een inkomensverlies van rond de 3 procent, maar een verlies van meer dan 10 procent kan ook niet worden uitgesloten. Een deel van deze onzekerheid is inherent aan voorspellingen op de lange termijn en de complexiteit van processen in zowel klimaat als economische systemen. Verder onderzoek is vereist om deze onzekerheden beter te begrijpen en in te perken.

Onderzoeksthema's

De eerdergenoemde onderzoeksvragen van mijn leeropdracht kunnen worden onderverdeeld in de volgende vier thema's:

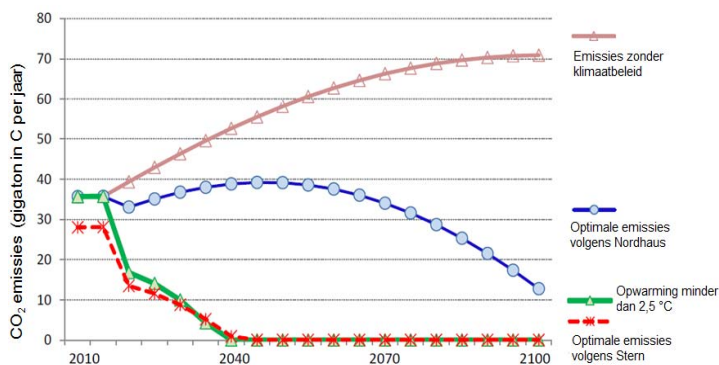
1. mondiale klimaat-economiemodellen van risico's van klimaatverandering;
2. lokale modellen van natuurramp risico's;
3. individuele beslissingen omtrent natuurramp risico's;
4. verzekeren van natuurrampschades.

Ik zal de huidige stand van kennis over elke thema toelichten, om zo tot een onderzoeksagenda te komen.

Mondiale klimaat-economiemodellen van risico's van klimaatverandering

Gestimuleerd door het pionierswerk van Yale-hoogleraar Nordhaus (1977, 1994) hebben economen zich gericht op de ontwikkeling van geïntegreerde klimaat-economiemodellen. Een doel van deze modellen is de economische gevolgen van klimaatverandering in kaart brengen. Daarnaast worden deze gevolgen ook afgewogen tegen de kosten voor het terugbrengen van de broeikasgasemissies. Aan de hand daarvan wordt een advies opgesteld over de hoeveelheid emissiereductie die op een specifiek moment economisch, dat wil zeggen: bezien vanuit de maatschappelijke welvaart, wenselijk is.

Deze grafiek geeft hiervan een voorbeeld (Figuur 6). De bovenste paarse curve toont de verwachte CO₂-emissies tot aan het eind van de eeuw in een business-as-usualscenario, zonder een streng klimaatbeleid. Deze emissies zullen substantieel stijgen door een groeiende wereldeconomie. De blauwe curve toont economisch optimale emissies volgens een geïntegreerd klimaat-economiemodel van Nordhaus (2017a). De optimale emissies zijn lager, zodat een deel van de negatieve effecten van klimaatverandering kan worden voorkomen. De optimale emissies volgen de rode curve als, volgens een methode van Stern, meer gewicht wordt gegeven aan toekomstige klimaatschades, middels een toepassing van een lage discontovoet in het model van Nordhaus. Deze ambitieuze reducties in CO₂-emissies beperken temperatuurstijging tot 2,5 graden Celsius. In dat geval dient de wereldwijde economie, binnen een tijdsbestek van ongeveer 20 jaar, te zijn getransformeerd tot een duurzame economie zonder broeikasgasemissies. Fossiele brandstoffen dienen dan plaats te hebben gemaakt voor een grootschalige winning van hernieuwbare energie.



Figuur 6. CO₂-emissies tot aan het eind van de eeuw volgens verschillende scenario's (Nordhaus, 2017a).

Een relevant instrument om de emissiereductie in de praktijk te realiseren is het beprijzen van CO₂. Het invoeren van een CO₂-belasting is een effectief middel om consumptie, productie en investeringen binnen een economie te sturen naar goederen en diensten met een laag CO₂ gehalte. Inkomsten uit een CO₂-belasting kunnen bovendien worden gebruikt om andere belastingen, zoals de loonbelasting, te verlagen. Het optimale niveau van een CO₂-belasting staat gelijk aan de maatschappelijke kosten van een ton CO₂-uitstoot. Volgens het regionale klimaat-economiemodel RICE van Nordhaus (2017b) bedraagt deze optimale CO₂-belasting 31 dollar per ton. Deze schatting betreft een optelsom van de kosten van klimaatverandering die een ton CO₂-uitstoot veroorzaakt in 12 regio's (Tabel 2). Deze kostenschattingen zijn weergegeven in deze tabel en lijken nauwkeurig. Bijvoorbeeld de Europese Unie heeft 4,79 dollar aan klimaatkosten per ton CO₂-uitstoot. Dit is echter een illusie. Dit blijkt bijvoorbeeld uit een meta-analyse van de geschatte kosten voor CO₂, die ik heb uitgevoerd met Jeroen van den Bergh in 2014 (van den Bergh en Botzen, 2014). Destijds waren al meer dan 300 waarden van deze kosten gerapporteerd in verschillende studies. De gemiddelde waarde is met 41 dollar per ton hoger dan die in het RICE-model, maar er bestaan ook hogere schattingen. In ons artikel hebben we een ondergrens vastgesteld van 125 dollar per ton voor studies die voldoende rekening houden met mogelijkheden van extreme risico's van klimaatverandering en effecten op de lange termijn.

Tabel 2. Kosten van klimaatverandering door een ton CO₂-uitstoot volgens het RICE model (Nordhaus, 2017b).

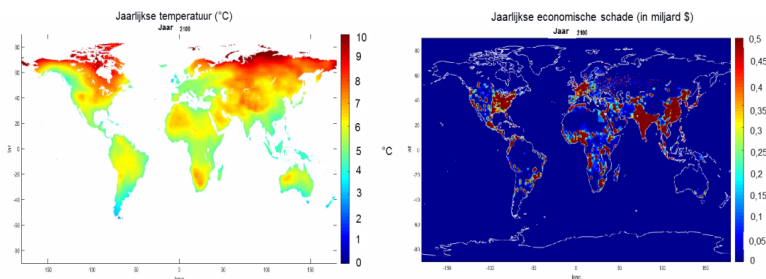
Regio	Kosten CO ₂	Regio	Kosten CO ₂
Verenigde Staten	\$4,78	China	\$6.61
EU	\$4,79	India	\$2.93
Japan	\$1,07	Midden-Oosten	\$2.16
Rusland	\$0,91	Afrika	\$1,03
Azië	\$1,56	Latijns-Amerika	\$1,87
Overige hoge inkomens	\$1,00	Overige	\$2,50

Over het nut en vooral ook de tekortkomingen van geïntegreerde klimaat-economiemodellen zijn verschillende artikelen geschreven (Stern, 2008; Botzen en van den Bergh, 2014; van den Bergh en Botzen, 2015; Botzen et al., 2017). Kritiekpunten zijn bijvoorbeeld de deels subjectieve aannames over sociale welvaartsfuncties en het verdisconteren op de lange termijn, en het economisch waarderen van de gevolgen van klimaatverandering voor ecosystemen, ziektes en mortaliteit. Ik kan

hier nu niet over uitweiden en richt me op een aantal andere aspecten waaraan ik de komende jaren wil werken.

Zoals eerder is beschreven door Stern (2013) vertonen de risico's van klimaatverandering volgens klimaatwetenschappers, en de vaak ad hoc of incomplete wijze waarop deze risico's in de economische modellen zijn gerepresenteerd, een discrepantie. De verschillende risico's van extreem weer kunnen bijvoorbeeld beter worden geïntegreerd in schattingen van klimaatschades. Daarnaast is de ruimtelijke differentiatie in de economische modellen grof, zoals de 12 regio's in het RICE-model. Als beleidsmaker is het niet eenvoudig om een adaptatiebeleid te ontwikkelen op basis van een schatting van verwachte klimaatschades voor bijvoorbeeld de gehele EU. Extreem weer en klimaatschades treden lokaal op en kunnen ook op lokaal niveau worden verminderd. Echter, hiervoor is informatie over de lokale economische gevolgen van klimaatverandering vereist.

Ruimtelijk gedetailleerde klimaat-economiemodellen. Bij het Instituut voor Milieuvraagstukken werk ik met collega's aan een nieuw klimaat-economiemodel, CLIMRISK, dat een aantal van deze tekortkomingen aanpakt. CLIMRISK heeft een klimaatmodule die op een schaal van 50 bij 50 kilometer probabilistische voorspellingen geeft van verwachte veranderingen in temperatuur en neerslag aan de hand van verschillende klimaatmodellen. Deze simulatie illustreert de verwachte temperatuurstijging van een run van het model in de loop der tijd, vanaf het heden tot het eind van de eeuw (Figuur 7). Vervolgens berekent het model op dezelfde lokale schaal en aan de hand van economische blootstelling de schade die deze klimaatverandering kan veroorzaken. Deze simulatie geeft weer hoe deze schade zich op den duur ontwikkelt (Figuur 7). In het kader van een nieuw EU-project, COACCH, dat deze maand van start is gegaan, wordt het model de komende jaren verder ontwikkeld. Een volgende stap binnen dit onderzoek is het nauwkeuriger integreren van de risico's van natuurrampen in het model. Deze betreffen de verwachte kosten van overstromingen volgens scenario's van klimaatverandering.



Figuur 7. Temperatuurstijging (links) en economische schade in miljard dollar (rechts) per 50 bij 50 kilometer aan het eind van deze eeuw volgens een run van het CLIMRISK-model.

Het nut van dergelijke lokale geïntegreerde klimaat-economiemodellen kan ik illustreren aan de hand van een eerdere versie van het CLIMRISK-model voor steden. Steden worden vaak als hotspots beschouwd met betrekking tot de impact van klimaatverandering. De blootstelling aan de gevolgen van klimaatverandering is hoog in steden. 54 procent van de wereldbevolking leeft in steden en dit aantal neemt naar verwachting toe tot 66 procent in 2050 (Munich Re, 2004; IPCC, 2014). Ongeveer 80 procent van het wereldwijde Bruto Nationaal Inkomen wordt verdiend in de steden. Het stedelijk warmte-eilandeffect, de bebouwing die warmte vasthoudt, zorgt ervoor dat de opwarming door klimaatverandering heviger is in de steden dan op het platteland (Zhao et al., 2014). In een recentelijk gepubliceerd artikel is voor meer dan 1600 steden wereldwijd berekend in hoeverre de opwarming toeneemt ten opzichte van de omgeving (Estrada et al., 2017). De resultaten zijn in deze tabel voor een representatieve stad en de 5 procent grootste steden weergegeven (Tabel 3). De extra opwarming betreft gemiddeld 1 graden Celsius voor de representatieve stad en gemiddeld 2 voor de grote steden. Deze opwarming komt dus bovenop de verwachte temperatuurstijging buiten de steden. Vervolgens

zijn met het model de verwachte economische schades van de totale opwarming per stad berekend. Deze schade, bijvoorbeeld door extra energieverbruik voor koeling, en schade door negatieve gezondheidseffecten loopt aan het eind van deze eeuw op tot 5,5 procent van het inkomen dat in de steden wordt verdiend.

Tabel 3. Extra opwarming door klimaatverandering en het stedelijk warmte-eilandeffect.

	2015	2050	2100
Representatieve stad	0,7°C	0,8°C	0,9°C
Top 5% steden	1,7°C	2,1°C	2,4°C

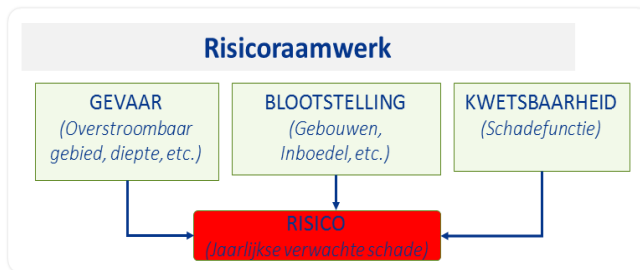
Steden kunnen deze schade deels voorkomen door zich aan te passen aan klimaatverandering. Met ruimtelijke ordening kunnen steden de hitte in de stad beperken. Voorbeelden hiervan zijn de aanleg van koele daken en wegen die minder warmte absorberen en de bevordering van meer groen en water in de stad. Deze illustraties geven enkele van deze voorbeelden weer. Een weg in Californië is wit gemaakt zodat deze minder warmte absorbeert. In het midden is een voorbeeld gepresenteerd van een looppad dat deels uit gras en deels uit witte stenen bestaat. Ook de aanleg van groene daken met zonnepanelen kan hitte reduceren en duurzame energie opwekken. Met behulp van het model zijn de baten en kosten voor soortgelijke maatregelen doorgerekend. Uit de resultaten blijkt dat de investeringen in deze maatregelen rendabel zijn: een investering van een euro levert gemiddeld tussen de 1,5 en 15 euro op, afhankelijk van het type maatregel en de verwachte klimaatverandering (Estrada et al., 2017). Het rendement is vooral hoog wanneer wereldwijd een omvangrijke hoeveelheid CO₂ wordt uitgestoten, en een internationaal klimaatakkoord dus faalt of ineffectief is. De adaptatiemaatregelen van een stad kunnen worden beschouwd als een verzekering tegen een klimaatramp, hoewel deze ook kosteneffectief zijn bij lage CO₂-emissies. Daarnaast heeft meer groen in de stad ook andere voordelen die in dit model niet zijn meegenomen. Een voordeel is bijvoorbeeld dat stadsbewoners het waarderen en gebruiken voor recreatie. In een EU-project genaamd NATURVATION werk ik samen met collega's van de Universiteit Utrecht en de Gemeente Utrecht om de lokale economische voordelen van natuur in de stad nader te onderzoeken.



Lokale modellen van natuurramp risico's

Risicoraamwerk. Er bestaat een grote hoeveelheid literatuur over catastrofemodellen die op regionale of lokale schaal inzichten kunnen verschaffen in natuurramp risico's (Grossi en Kunreuther, 2005; de Moel et al., 2015). Deze modellen schatten in een bepaald gebied de directe schade die bijvoorbeeld overstromingen of stormen kunnen veroorzaken. Deze schatting verloopt volgens het standaard-risicoraamwerk op deze afbeelding (Figuur 8; Kron, 2005). In het geval van bijvoorbeeld overstromingen simuleren hydrologische modellen en inundatiemodellen het natuurgevaar, met als resultaten welke gebieden kunnen overstroomd worden en wat de waterdieptes zijn. Vervolgens kan aan de hand van informatie over de waarde van economische blootstelling, bijvoorbeeld van gebouwen en inboedel, alsmede aan de hand van aannames over de kwetsbaarheid daarvan, worden berekend hoeveel schade een overstroming kan veroorzaken. Indien zulke simulaties worden uitgevoerd voor een reeks mogelijke overstromingen met verschillende hevigheid en de kans op het voorkomen ervan in kaart wordt gebracht, kan de gemiddelde jaarlijkse overstromingsschade worden berekend, oftewel het risico (Merz et al., 2010). Daarnaast kunnen schattingen van schades en getroffen populatie ook

gebruikt worden als input in algemene evenwichtsmodellen. Deze brengen de indirecte schade voor de economie in termen van verloren productie in kaart (Carrera et al., 2015).



Figuur 8. Componenten van het risicoraamwerk.

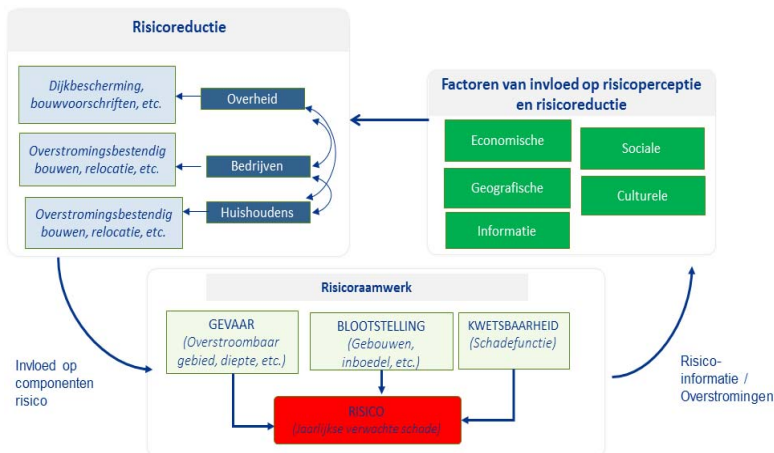
Deze risicoberekeningen worden voor verschillende toepassingen gebruikt, namelijk voor ruimtelijke ordening, het vaststellen van verzekeringspremies en voor het bepalen van investeringen in dijkbescherming of bouwvoorschriften in specifieke gebieden. Met dit raamwerk kan worden ingeschat in hoeverre de verwachte schade beperkt kan worden met risicoreductiemaatregelen. Deze schadereductie kan dan worden afgewogen tegen de investerings- en onderhoudskosten in een maatschappelijke kosten-batenanalyse die aangeeft welke maatregelen economisch rendabel zijn.

Geïntegreerde risico- en kosten-batenanalyse. Een voorbeeld van een geïntegreerde risico- en kosten-batenanalyse is een studie die ik met collega's Jeroen Aerts, Hans de Moel en verschillende Amerikaanse wetenschappers heb uitgevoerd voor de stad New York (Aerts et al., 2014). In 2012 is New York zwaar getroffen door orkaan Sandy met 19 miljard dollar schade als gevolg. Voor de stad hebben wij een gedetailleerde overstromingsrisicoanalyse uitgevoerd op basis van 549 mogelijke orkanen met betrekking tot het huidige klimaat en scenario's van klimaatverandering. Deze risico's zijn berekend met en zonder verschillende strategieën voor overstromingsrisicomanagement, zoals de aanleg van grootschalige stormvloedkeringen en bouwvoorschriften, waaronder een strategie voor de ophoging van nieuwbouw in de buurt van het water. Hierdoor is ingeschat hoeveel overstromingsschade per strategie kan worden vermeden. In een kosten-batenanalyse is vervolgens bepaald of de kosten van deze strategieën opwegen tegen de baten. De resultaten die het meest relevant zijn, betreffen de baten-kostenratio's voor de stormvloedkering en de ophoging van nieuwbouw, zoals deze tabel laat zien (Tabel 4). Zelfs de goedkoopste variant van de geanalyseerde stormvloedkeringen heeft economisch gezien geen netto baten in het huidige klimaat. Gemiddeld levert een investering van 1 dollar slechts 0,5 dollar op. Echter, door zeespiegelstijging en een verwachte toename in de frequentie van orkanen biedt deze investering bij een scenario van klimaatverandering wel netto baten. Ophoging van nieuwbouw is economisch rendabel en levert per investering van 1 dollar in de huidige situatie 2 dollar op en bij een toekomstige klimaatverandering wordt 13 dollar aan schade vermeden. Zoals in het artikel is beschreven zijn deze resultaten aan een uitgebreide gevoeligheidsanalyse onderworpen en robuust gebleken. De stad heeft de aanbevelingen voor het aanscherpen van bouwvoorschriften overgenomen, en andere risicoreductiemaatregelen genomen die in het plan "A stronger and more resilient New York" beschreven zijn (New York City, 2013).

Tabel 4. Baten-kosten ratio's van strategieën voor overstromingsrisicomanagement in de stad New York (Aerts et al., 2014).

	Huidig klimaat	Klimaatverandering
Stormvloedkering	0,5	2
Ophogen nieuwbouw	2	13

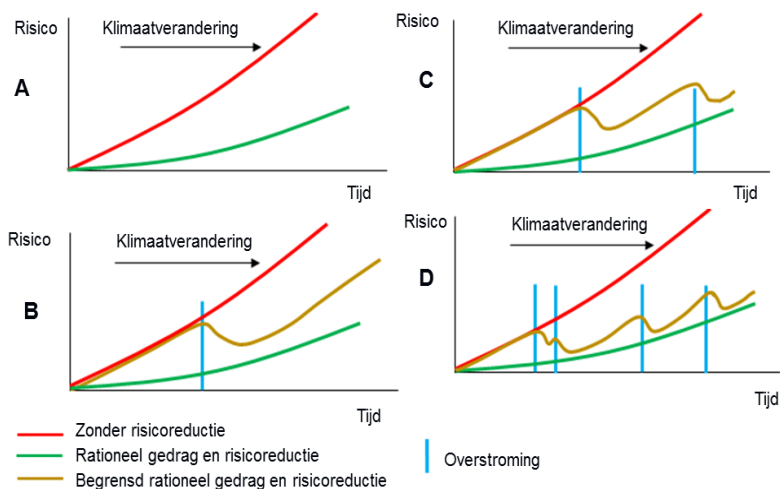
Beperkingen risicoanalyse. Dit voorbeeld toont aan dat het risicoraamwerk nuttig is voor het geven van beleidsadvies. Het toont echter ook aan dat de standaardaanpak een essentiële dynamiek mist. Van een constant risico is namelijk, vanwege de risicoreductiemaatregelen die de stad New York heeft genomen na orkaan Sandy, geen sprake. De beperkingen van de standaardmethode kan ik aan de hand van dit figuur illustreren (Figuur 9). Het risicobewustzijn dat kan leiden tot het nemen van risicoreductiemaatregelen verandert door de informatie die uit de risicoanalyse voorkomt of doordat overstromingen plaatsvinden. Met betrekking tot New York heeft orkaan Sandy een katalysatorrol gespeeld. Voor andere landen bestaan vergelijkbare voorbeelden. In Nederland is bijvoorbeeld de watersnoodramp in 1953 een aanleiding geweest om in de Deltawerken te investeren, waardoor de kans op een overstroming aanzienlijk is verlaagd. Een ander voorbeeld zijn de hoge waterstanden in 1993 van de rivieren de Maas en de Rijn. Deze waterstanden hebben ertoe geleid dat huishoudens langs de rivier zich grondiger hebben voorbereid op het overstromingsrisico, waardoor de schade bij vergelijkbaar hoogwater in 1995 substantieel minder was (Wind et al., 1999; Bubeck et al., 2012a). Het verhoogde risicobewustzijn kan leiden tot risicoreductie. Uit literatuur hierover blijkt dat dit ook afhankelijk is van andere factoren, waaronder van de economische, geografische, sociale en culturele context (Cutter et al., 2003; Bubeck et al., 2012b; Botzen et al., 2016). Verschillende agenten – de overheid, bedrijven en huishoudens – kunnen risicoreductie realiseren door hiervoor onafhankelijk van elkaar of juist op interactieve wijze maatregelen te nemen. De overheid kan bijvoorbeeld de kans op overstromingen verkleinen door de aanleg van dijkinfrastructuur en kan ook via bouwvoorschriften de overstromingsschade beperken. Huishoudens en bedrijven kunnen risico's reduceren middels locatiebeslissingen of overstromingsbestendig bouwen. Zij zijn minder vaak geneigd maatregelen te nemen wanneer de overheid hierin al haar verantwoordelijkheid neemt of wanneer zij deze partijen hier niet toe aanzet. Uiteindelijk beïnvloeden deze beslissingen de componenten in het risicoraamwerk, zoals de economische blootstelling aan het natuurgevaar en de kwetsbaarheid hiervan, en dus ook het uiteindelijke risico.



Figuur 9. Dynamiek in het risicoraamwerk.

Hydrologische-sociaaleconomische interacties kunnen van invloed zijn op de ontwikkeling van overstromingsrisico's in de loop der jaren. Klimaatverandering speelt hierbij een rol. Deze schematische grafiek illustreert dit (Figuur 10). De rode curve toont een verwachte stijging van overstromingsrisico's door klimaatverandering, wanneer hiervoor geen extra risicoreductiemaatregelen worden genomen. Deze aanname over een constante kwetsbaarheid is veelvoorkomend in verschillende studies die de toekomstige overstromingsrisico's schatten in bijvoorbeeld een scenario met zeespiegelstijging. Wanneer wel kosteneffectieve risicoreductiemaatregelen worden genomen, leidt dit tot een overschatting van de kosten voor

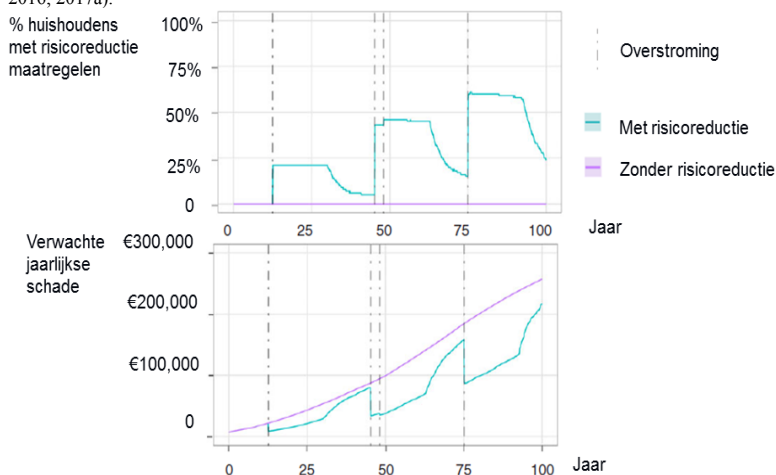
klimaatverandering, zoals de groene curve weergeeft. Deze curve gaat uit van economisch rationeel gedrag waarbij geleidelijk maatregelen worden genomen om de effecten van klimaatverandering te reduceren. In werkelijkheid is dit gedrag complexer en is sprake van begrensd rationeel gedrag. Een extreem voorbeeld hiervan is weergegeven in grafiek B. Overheden en huishoudens onderschatten hier het risico op een overstroming en deze nemen pas maatregelen na een overstromingsramp, hier met een blauwe staaf aangegeven. Het risico, weergegeven met de bruine curve, stijgt dan eerst vanwege klimaatverandering, neemt af na een overstroming door extra maatregelen en stijgt vervolgens wanneer het bewustzijn weer is afgenomen en de investeringen in risicoreductie niet verder toenemen. In dit geval is de ontwikkeling van het risico het resultaat van een complex proces dat van de interacties tussen het hydrologische en het menselijke systeem afhangt. Wanneer bijvoorbeeld twee overstromingen plaatsvinden, zoals in grafiek C, of vier zoals in grafiek D, ontwikkelt het risico in de bruine curve zich weer op een andere wijze.



Figuur 10. Invloed van hydrologische-sociaaleconomische interacties op de ontwikkeling van overstromingsrisico's (Aerts et al., 2017).

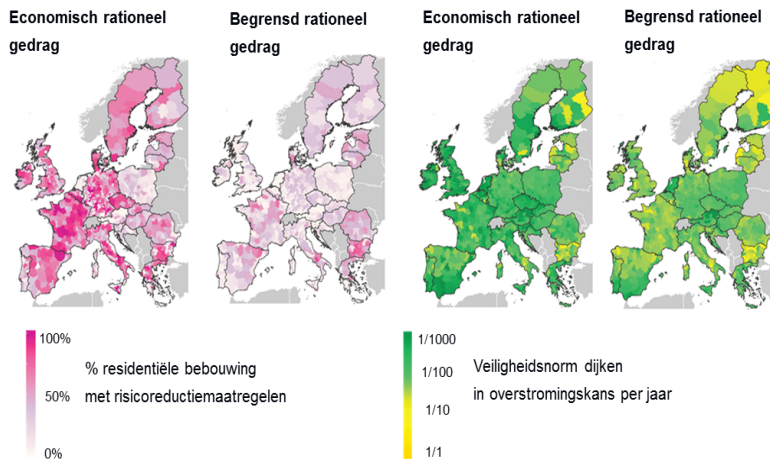
Agent-based modellen. Om complexe dynamische interacties tussen menselijke en hydrologische systemen te beschrijven, moeten nieuwe methodes worden ontwikkeld (Di Baldassarre et al., 2013). Agent-based modellen zijn een veelbelovende methode om de onderliggende dynamiek in deze figuren op een systematische wijze te simuleren. Agenten, zoals overheden, bedrijven en huishoudens, kunnen in deze modellen verschillende beslissingsprocessen volgen die bepalen of zij maatregelen nemen tegen het risico aan de hand van beslissingsregels, waaronder de maximalisering van hun eigen welvaart of de minimalisering van kosten en spijt. Individuen, met hun specifieke karakteristieken, kunnen in dergelijke modellen leren van risico's aan de hand van ervaringen, sociale interacties, en beschikbare informatie en worden beïnvloed door elkaar of andere agenten, zoals de overheid of hun verzekeraar. Bij het Instituut voor Milieuvraagstukken zijn de afgelopen jaren een aantal agent-based modellen ontwikkeld die zijn geïntegreerd in een ruimtelijk specifiek overstromingsschademodel. In deze modellen kunnen de adaptatiebeslissingen van agenten de kans op schade van overstromingen beïnvloeden. Dergelijke modellen kunnen worden gebruikt om de verwachte ontwikkeling van toekomstige overstromingsrisico's in te schatten. Een voorbeeld is een model dat voor Heijplaat is ontwikkeld (Haer et al., 2017a). Dit is een wijk in het buitendijkse gebied van Rotterdam met een voor Nederlandse begrippen hoge kans op overstromingen.

In dit model kunnen huishoudens besluiten om te investeren in maatregelen die overstromingsschade verlagen. De beslisregels hiervoor zijn gebaseerd op drie gedragseconomische theorieën: de rationale verwachte nutstheorie; de prospect theorie waarbij mensen overstromingskansen kunnen onder- of overschatten in hun beslissingen en een Bayesiaanse theorie waarbinnen de percepties met betrekking tot overstromingsrisico's samenhangen met eerdere overstromingen, sociale interacties en de media. Deze grafiek geeft de resultaten van deze laatste gedragstheorie weer (Figuur 11). Bij dit voorbeeld zijn vier overstromingen in Heijplaat met verticale stippellijnen aangegeven. De blauwe curve in de bovenste grafiek geeft het percentage inwoners weer dat risicoreductiemaatregelen neemt. Dit percentage stijgt vlak na een overstroming en daalt daarna geleidelijk. Uit de onderste grafiek blijken de gevolgen van dit gedrag voor de ontwikkeling van het overstromingsrisico. De paarse curve geeft de ontwikkeling in het risico weer. Deze is gebaseerd op een standaardaanname in de literatuur dat men geen extra maatregelen neemt, terwijl het overstromingsrisico geleidelijk toeneemt door zeespiegelstijging. De blauwe curve is de ontwikkeling in het risico als wel rekening wordt gehouden met de risicoreductiemaatregelen van huishoudens. Wanneer na een overstroming veelvuldig maatregelen worden genomen neemt het risico af. Daarna stijgt het risico geleidelijk tot de volgende overstroming. Een belangrijke boodschap voor beleidsmakers is dat het van belang is om huishoudens te stimuleren om kosteneffectieve risicoreductiemaatregelen te nemen in periodes waarin hun risicobewustzijn laag is. Modelsimulaties tonen aan dat effectieve beleidsopties hiervoor bestaan uit financiële prikkels, zoals een korting op verzekeringspremies als beloning voor risicoreductie, en uit informatiecampagnes over het risico en de te nemen maatregelen (Haer et al., 2016; 2017a).



Figuur 11. Percentage huishoudens met risicoreductiemaatregelen (boven) en de verwachte jaarlijkse schade (onder) over een periode van 100 jaar volgens een run van een agent-based model voor Heijplaat (Haer et al., 2017a).

Een onzekerheid van agent-based modellen in deze context betreft de empirische basis van de gedragsregels. Verschillende typen gedrag omtrent risicoreductie hebben namelijk een grote invloed op de risicoschattingen. Dit blijkt uit een lopend onderzoek met Toon Haer en Jeroen Aerts waarvan ik enkele eerste resultaten kan delen (Haer et al., 2017b). Voor dit onderzoek is een agent-based model ontwikkeld om toekomstige overstromingsrisico's van grote rivieren in de gehele Europese Unie in te schatten. Deze afbeelding toont links het percentage residentiële bebouwing waarvoor in de toekomst maatregelen worden genomen om overstromingsschade te beperken en rechts is de veiligheidsnorm van dijken met betrekking tot de overstromingskans per jaar weergegeven (Figuur 12).



Figuur 12. Percentage residentiële bebouwing met risicoreductiemaatregelen (links) en de veiligheidsnorm van dijken (rechts) volgens economisch rationeel of begrensd rationeel gedrag in een agent-based model (Haer et al., 2017b).

In het geval van economisch rationeel gedrag investeert men in risicoreductie wanneer deze investeringen economisch rendabel zijn. De bescherming is dan hoog. De meeste dijken zijn bijvoorbeeld zo aangelegd dat een overstroming lokaal gemiddeld slechts eenmaal in de 100 of 1000 jaar voorkomt. Van begrensd rationeel gedrag is sprake wanneer mensen overstromingsrisico's vaak onderschatten en overheden vooral investeren in bescherming nadat de ramp heeft plaatsgevonden. In dat geval is, zoals deze kaarten illustreren, de bescherming tegen overstromingen veel lager. In dit artikel is de ontwikkeling van overstromingsrisico's onderzocht aan de hand van zes combinaties van voorbereidingsgedrag en verschillende scenario's van klimaatverandering. Hieruit blijkt dat de onzekerheid over het voorbereidingsgedrag het risico meer beïnvloedt dan de onzekerheid over klimaatverandering.

Individuele beslissingen omtrent natuurramp risico's

De discipline gedragseconomie heeft veel kennis te bieden over de wijze waarop mensen omgaan met een kleine kans op risico's die grote gevolgen hebben, zoals natuurrampen. Deze kennis kan worden toegepast bij het opstellen van gedragsregels in agent-based modellen om toekomstige overstromingsrisico's in kaart te brengen. Daarnaast is deze kennis relevant voor het risicomanagementbeleid. Dat beleid tracht namelijk steeds vaker de voorbereidingen op natuurrampen van huishoudens en bedrijven te verbeteren. Populaire termen hiervoor zijn 'meerlaagse veiligheid' of 'geïntegreerd risicomanagement'. Dit houdt in dat burgers zelf ook verantwoordelijk zijn voor de beperking van gevolgschade, naast de verantwoordelijkheid die de overheid heeft om natuurramp risico's via bijvoorbeeld de versterking van dijkinfrastructuur te verkleinen.

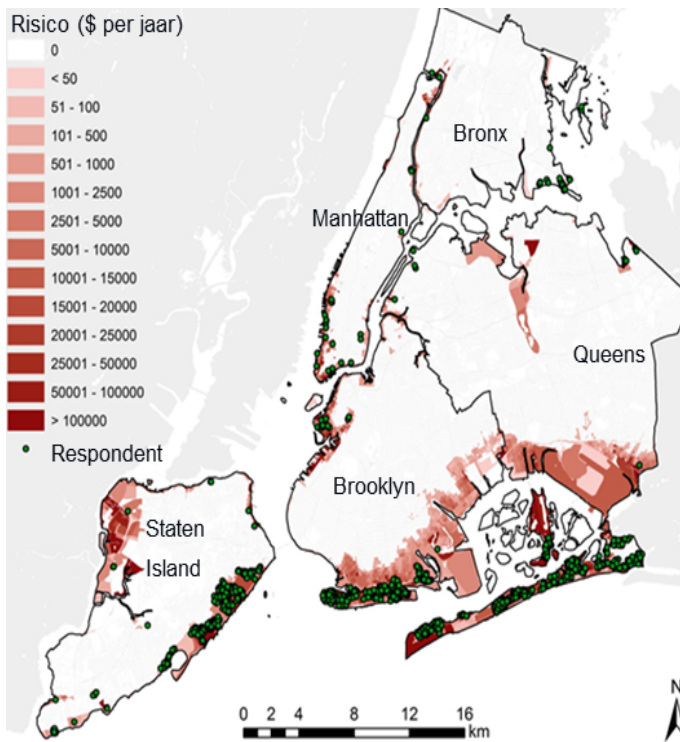
Verscheidende studies hebben namelijk aangetoond dat huishoudens zelf ook maatregelen kunnen nemen die veel schade vermijden. Deze afbeelding geeft een voorbeeld van een hoger gelegen woning. Ook kunnen huishoudens eenvoudigere kleinschalige maatregelen nemen die het water buiten de woning houden of de schade beperken wanneer het water de woning binnendringt (Kreibich et al., 2005; Aerts et al., 2013).



Hoewel verscheidende maatregelen kosteneffectief zijn in gebieden met een hoog overstromingsrisico, blijkt regelmatig dat mensen deze maatregelen niet nemen (Kunreuther, 1996; Kreibich et al., 2011; Poussin et al., 2015). De gedragseconomie biedt hiervoor verscheidende verklaringen. Mensen zijn begrensd rationeel en onderschatten bijvoorbeeld het risico dat zij lopen wanneer ze zelf nog geen overstroming hebben meegemaakt (Kunreuther en Pauly, 2004; Botzen et al., 2009a). Zij onderschatten dan ook de baten van risicoreductie. De investeringen in risicoreductiemaatregelen brengen op de korte termijn relatief hoge kosten met zich mee en vertonen op de lange termijn pas baten in termen van minder schade (Aerts et al., 2013). Mensen met een kortetermijnplanning die toekomstige baten sterk verdisconteren, nemen dergelijke maatregelen vaak niet. Het is bovendien niet eenvoudig om beslissingen te nemen met betrekking tot extreme risico's (Kunreuther et al., 2001). Personen baseren hun beslissingen vaak niet op economisch rationele overwegingen, maar vertrouwen op hun intuïtie en passen simpele beslisseregels toe, oftewel heuristieken (Kahneman, 2003; 2011).

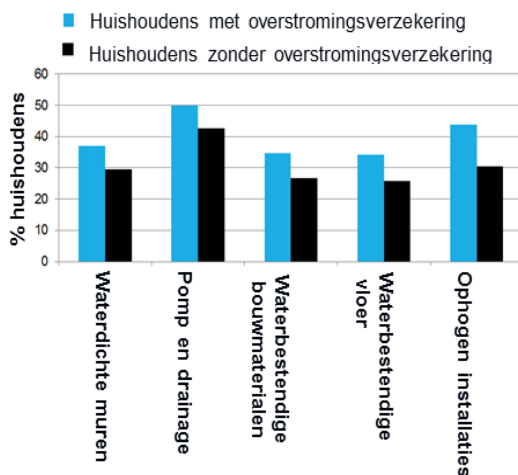
Vragenlijststudies risicoperceptie en voorbereiding op natuurrampen. Percepties van natuurramp risico's en processen omtrent voorbereidingen op natuurrampen dienen lokaal te worden onderzocht, omdat deze afhankelijk zijn van de lokale context. Wetenschappelijk onderzoek hiernaar wordt vaak uitgevoerd door middel van vragenlijsten die gegevens achterhalen van huishoudens in gebieden waar natuurrampen kunnen plaatsvinden (Bubeck et al., 2012b). Een voorbeeld is een vragenlijst die ik met collega's van de Wharton School heb uitgevoerd in New York, enkele maanden na orkaan Sandy. Meer dan 1000 bezitters van huizen in gebieden met verscheidende overstromingsrisico's in New York hebben deze vragenlijst via de telefoon beantwoord. Op deze kaart geven de groene stippen de locatie van respondenten aan en in het rood is het overstromingsrisico van een huizenblok gepresenteerd (Figuur 13). De vragenlijst bevat meer dan 100 vragen over percepties van overstromingsrisico's, over voorbereidingsmaatregelen die huishoudens voor orkaan Sandy hebben genomen en over de verscheidende factoren die dit gedrag kunnen beïnvloeden.

Hieruit is gebleken dat een minderheid van de huishoudens de overstromingskans en de schade aan het huishouden correct inschat in vergelijking met de schattingen van experts (Botzen et al., 2015). Dit is ook het geval wanneer een foutmarge van 50 procent is toegestaan. In dat geval overschatten de meeste mensen de kans op een overstroming, maar onderschatten de meesten de schade die een overstroming kan veroorzaken. Deze onderschatting van schade kan verklaren waarom de inwoners zich grotendeels onvoldoende op de overstroming hebben voorbereid. Verscheidende statistische analyses tonen aan dat het onderschatten van schade gerelateerd is aan intuïtieve denkprocessen, die bijvoorbeeld betrekking hebben op een lage mate van bezorgdheid of een hoog vertrouwen in waterbeheer van de overheid.



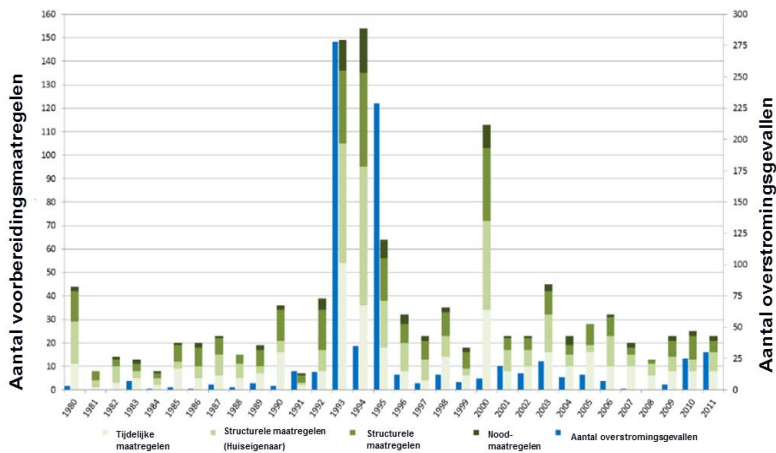
Figuur 13. Kaart van New York met in het groen de locatie van respondenten en in het rood het overstromingsrisico (in dollar per jaar) van een huizenblok (Botzen et al., 2015).

In deze studie is ook onderzocht hoeveel inwoners maatregelen in huis hebben genomen om de overstromingsschade te beperken en hoe dit samenhangt met verschillende factoren, zoals het vrijwillig afsluiten van een overstromingsverzekering. Deze grafiek geeft in blauw het percentage huishoudens met een overstromingsverzekering weer dat een aantal van deze maatregelen heeft genomen (Figuur 14). In het zwart is het percentage huishoudens zonder een dergelijke verzekering gepresenteerd (Botzen et al., 2017). Hieruit blijkt dat mensen met een verzekering zich beter hebben voorbereid. In dit geval is deze voorbereiding niet ontstaan omdat verzekeraars hier extra eisen aan hebben gesteld. Een verklaring is dat deze mensen voorzichtiger zijn en meer aversie hebben tegen het nemen van risico's. Toch zijn er ook verschillende andere redenen waarom sommige mensen zich wel of juist niet hebben voorbereid op orkaan Sandy. Personen die ervan uit zijn gegaan dat de federale overheid hun schade zou vergoeden, hebben zich minder vaak verzekerd en hebben minder andere risicoreductiemaatregelen genomen (Botzen et al., 2017).



Figuur 14. Percentage huishoudens in New York dat maatregelen heeft genomen om overstromingsschade te beperken (Botzen et al., 2017).

Aan de hand van studies, zoals deze vragenlijst in New York, kan dus kennis worden vergaard. Het betreft hier echter een momentopname; mensen hadden een hoog risicobewustzijn vlak na orkaan Sandy. Deze studie biedt geen inzicht in de wijze waarop risicopercepties en voorbereidingen op den duur veranderen. Dit geldt voor het overgrote deel van de studies over dit onderwerp die van eenmalig uitgevoerde vragenlijstonderzoeken gebruikmaken (Siegrist, 2013). Toekomstig onderzoek dient de dynamische aspecten van gedrag met betrekking tot de risico's nauwkeuriger in kaart te brengen (Bubeck et al., 2013). Een voorbeeld van een studie die hier wel naar streeft, heb ik uitgevoerd met voormalige promovendus Philip Bubeck en andere collega's (Bubeck et al., 2012a). Door middel van een vragenlijst die door 750 huishoudens langs het Duitse gedeelte van de Rijn is ingevuld, is in kaart gebracht op welk moment zij maatregelen tegen overstromingen hebben genomen in de periode van 1980 tot 2011. In deze grafiek duiden de groene staven het aantal specifieke maatregelen aan dat deze mensen hebben getroffen en is in het blauw het aantal overstromingsgevallen in een jaar weergegeven (Figuur 15). Het valt op dat vooral maatregelen zijn genomen bij de voorbereiding op het hoogwater in 1993 en 1995 of net daarna, en in een paar andere jaren met een dreiging van hoogwater zoals in 2000. Dit ondersteunt de algemene bevinding dat mensen zich voornamelijk voorbereiden op natuurrampen in het geval van een acute dreiging, of net daarna wanneer het dus te laat is. Het is van belang dat het beleid inwoners in gebieden met een hoog risico ertoe aanzet zich voor te bereiden op natuurrampen voordat van een acute dreiging sprake is.

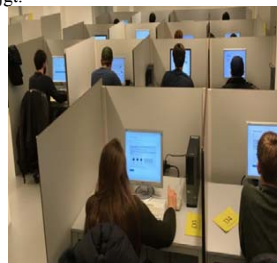


Figuur 15. Aantal voorbereidingsmaatregelen op overstromingen genomen door 750 huishoudens langs het Duitse gedeelte van de Rijn in de periode van 1980 tot 2011 (Bubeck et al., 2012a).

Academici hebben hiervoor verschillende voorstellen gedaan, maar de effectiviteit van de aansturing op individuele investeringen in risicoreductie is onvoldoende onderzocht (Botzen et al., 2009b; Kunreuther, 2015). Voorbeelden hiervan zijn de verhoging van het risicobewustzijn via informatiecampagnes, de verstrekking van subsidies of leningen met lage rentes om de risicoreductiemaatregelen te financieren, of een beloning van risicoreductie met een betere dekking door of lagere premies van verzekeringen. Geïnspireerd door professor Richard Thaler, de laatste winnaar van de Nobelprijs voor de economie, is het ook relevant om te analyseren hoe voorbereidingen op natuurrampen kunnen worden verbeterd met behulp van ‘nudges’ die Thaler beschrijft in zijn boek (Thaler en Sunstein, 2008). Een nudge is bijvoorbeeld door middel van informatievoorziening bereiken dat men een juiste voorbereiding op risico’s beschouwt als een sociale norm of status quo. In het VIDI-project dat mij is toegewezen door NWO worden verschillende economische experimenten uitgevoerd die de effectiviteit van financiële prikkels en dergelijke nudges testen op basis van gedragseconomische theorieën.

Een van deze experimenten is een paar weken geleden uitgevoerd in het CREED-lab van de Universiteit van Amsterdam. Hieraan hebben meer dan 300 studenten deelgenomen. Zij zijn de toekomstige generatie die met de klimaatproblematiek te maken krijgt.

Deze foto toont een sessie van het computerexperiment. In dit experiment hebben de deelnemers investeringsbeslissingen genomen om overstromingsschade te beperken onder verschillende condities van risico’s, verzekeringsdekking, het eigen risico, kortingen op premies voor risicoreductie en van leningen die de investeringskosten spreiden. Door de financiële uitbetaling van het experiment afhankelijk te maken van de gemaakte keuzes kan de werkelijkheid zo nauwkeurig mogelijk worden nagebootst. Dit geeft inzichten in de wijze waarop voorbereidingen op overstromingen via deze financiële prikkels kunnen worden gestuurd naar economisch optimale investeringen.



De eerste resultaten tonen aan dat vooral premiekortingen hiervoor een effectief middel zijn (Mol et al., 2017). Vergelijkbare experimenten met huizenbezitters in overstroombare gebieden zijn voor volgend jaar gepland.

Verzekeren van natuurrampschades

Het onderwerp ‘verzekeren van natuurrampschades’ is al een paar keer aan bod gekomen tijdens deze rede. Verzekeringen kunnen een belangrijke rol spelen in de beheersing van natuurramp risico’s (Botzen, 2013). Financiële compensatie na een ramp bespoedigt de wederopbouw en beperkt daarmee economische schade. Verzekeringssystemen kunnen een efficiënt middel zijn om de risico’s te spreiden die voor het individu te groot zijn om persoonlijk te dragen, wat bij natuurrampen vaak het geval is. Natuurrampen zijn echter een complex risico om te verzekeren (Botzen en van den Bergh, 2008). Overstromingsrisico’s hebben veelal een bepaalde mate van ruimtelijke correlatie en veroorzaken mogelijk hoge totale schade, hoewel de kans daarop vaak klein is. Afhankelijk van de verzekeringsvorm kan een verzekering tegen dergelijke risico’s relatief duur zijn. Ook is de consumentenvraag niet altijd hoog, wat afhankelijk is van de lokale context. Wat dit betreft is Nederland een relevant voorbeeld.

De kans op overstromingen in Nederland is klein vanwege de degelijke dijkinfrastructuur. Toch heeft Nederland een restrisico, waarvoor financiële compensatie vereist is wanneer zich toch een overstroming voordoet. Deze foto toont hiervan een voorbeeld: de dijkverschuiving in Wilnis. De overstromingsschade is niet standaard met opstal- en inboedelverzekeringen gedekt maar er bestaat de mogelijkheid dat de overheid deze schade deels vergoedt. De overheidsvergoeding is echter onzeker. In het geval van Wilnis is uiteindelijk ongeveer de helft van de schade gecompenseerd (Kok, 2006), waarna een jarenlang juridisch getouwtrek over verdere compensatie heeft plaatsgevonden. De aanschaf van een aparte overstromingsverzekering kan meer zekerheid bieden.

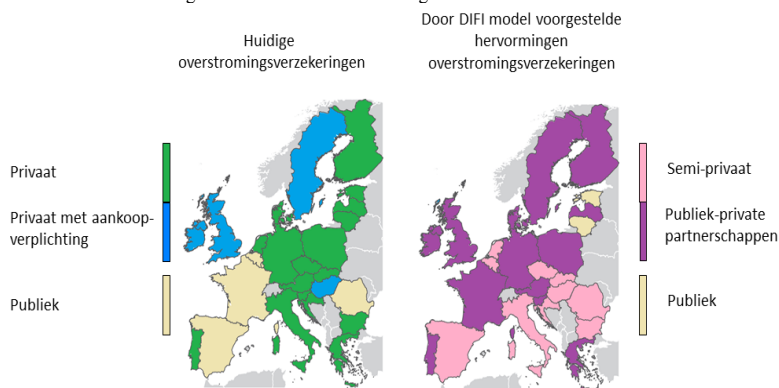


De vraag naar een dergelijke verzekering heb ik afgelopen zomer met Peter Robinson onderzocht door middel van een vragenlijstonderzoek onder meer dan 1000 Nederlandse huizenbezitters (Robinson en Botzen, 2017). Dit onderzoek bestaat uit een gedragseconomisch experiment waaruit de bereidheid om te betalen voor een overstromingsverzekering onder verschillende risico’s kan worden afgeleid. De theoretische basis is gevormd door de prospect theorie en dit experiment analyseert waarom sommige mensen overstromingskansen een te laag of juist een te hoog gewicht geven in hun beslissing om zich te verzekeren. De resultaten tonen aan dat hierin grote verschillen bestaan tussen groepen huishoudens. In het geval van de hoogste veiligheidsnorm van dijken heeft bijvoorbeeld iets meer dan helft van de huishoudens meer geld over voor deze verzekering dan de verwachte kosten van de verzekering, wat duidt op voldoende consumentenvraag. Ongeveer een kwart van de huizenbezitters heeft helemaal geen interesse in deze verzekering. Dit zijn over het algemeen personen die zich nauwelijks zorgen maken over de gevolgen van een overstroming, die de kans op schade te laag vinden, of die verwachten spijt te krijgen van het betalen van premies zonder aanspraak te hoeven maken op compensatie. Eerder onderzoek heeft ook aangetoond dat de mogelijkheid tot compensatie van overstromingsschade door de overheid de vraag kan ondermijnen (Botzen en van den Bergh, 2012a,b). Als de overheid de private verzekeraar tegen overstromingsschade wil bevorderen dan dient zij concrete keuzes te maken omtrent de wenselijkheid van de huidige ad hoc schaderegeling.

Vanwege de verwachte toename in overstromingsrisico’s heerst in verschillende landen discussie over de houdbaarheid van de huidige overstromingsverzekeringsvormen (Surminski et al., 2015). De EU kent een omvangrijke variatie in marktvormen van overstromingsverzekeringen die deels historisch zo gegroeid is. Deze afbeelding classificeert deze systemen in drie categorieën (Figuur 16). De meeste landen beschikken over een vorm van een privaat verzekeringsproduct dat overstromingsschade dekt. Een brede overstromingsdekking met een hoge marktpenetratie komt echter meestal alleen voor in combinatie met regelgeving die consumenten in bepaalde gevallen verplicht de verzekering af te

sluiten. Tevens speelt de overheid vaak een rol in het garant staan voor dekking tegen extreme schades, via een herverzekeringsconstructie of anderzijds via een publieke verzekering.

Een aantal discussiepunten keert steeds terug. Geven de verzekeringen huizenbezitters voldoende prikkels om de risicoreductiemaatregelen te treffen die de stijgende schadelast afremmen? Blijven de verzekeringen nog wel betaalbaar? Is de dekking wel voldoende voor het overgrote deel van huishoudens in gebieden met hoge overstromingsrisico's? Deze complexe vraagstukken zijn onderzocht met het Dynamic Integrated Flood Risk and Insurance, oftewel het DIFI-model, van het IVM dat in mijn NWO-VIDI-project verder wordt ontwikkeld (Hudson et al., 2017). Uit de eerste resultaten van dit model blijkt dat hervormingen vereist zijn om in de toekomst bestand te zijn tegen een stijgende schadelast (Hudson, 2017). Voor sommige landen zijn semiprivate systemen waarin de overheid een rol speelt in het dekken van extreme schade bijvoorbeeld gunstig om de betaalbaarheid van de dekking te bevorderen. In andere landen is een verdere publiek-private samenwerking wenselijk om via het solidariteitsprincipe de premiekosten tot een zekere hoogte te delen voor huishoudens met hoge en lage risico's (Figuur 16). In bijna alle gevallen is het van belang om voldoende prikkels voor risicoreductie te genereren. Deze EU-brede discussie raakt echter aan maatschappelijke en politieke afwegingen tussen efficiëntie en solidariteit, die beter op nationaal niveau kunnen plaatsvinden. Wetenschappelijke studies, bijvoorbeeld op basis van het DIFI-model, kunnen inzicht verschaffen in de gevolgen van deze politieke keuzes voor de verwachte ontwikkelingen van risico's, premies, betaalbaarheid, en de marktpenetratie. Aan de hand van deze informatie kunnen beter geïnformeerde keuzes worden gemaakt.



Figuur 16. Huidige markt vormen van overstromingsverzekeringen in de EU en de door het DIFI model voorgestelde hervormingen (Hudson et al., 2017).

Samenvattend: de weg vooruit

Bij een oratie hoort een onderzoeksagenda. Daarvan zijn al verschillende onderwerpen aan bod gekomen die ik kort zal samenvatten.

Geïntegreerde klimaat-economi modellen kunnen op mondiale schaal inzicht verschaffen in de economische gevolgen van klimaatverandering en een advies genereren over het internationaal klimaatbeleid. De onzekerheden in deze modellen zijn echter groot. Het is van belang om een brug te slaan tussen de klimaatwetenschappen en de economische modellen om de lokale risico's beter in deze modellen te verwerken.

Inzicht in lokale natuurramp risico's en in de wijze waarop deze zich in de toekomst ontwikkelen vormen een relevante basis voor het klimaatadaptatiebeleid. De huidige methodes van risicoanalyse

houden echter onvoldoende rekening met veranderingen in de economische blootstelling aan natuurgevaren en de kwetsbaarheid hiervan, en in hoeverre deze veranderingen onderhevig zijn aan het plaatvinden van rampen of de toepassing van beleid. De gedragseconomie biedt inzichten in deze factoren die door investeringsbeslissingen omtrent risicoreductie worden bepaald. Zoals ik heb aangetoond kunnen begrensd rationele economische adaptatiebeslissingen worden geïntegreerd in risicoanalyses via agent-based modellen.

Gedragseconomische en psychologische studies hebben individuele risicopercepties en beslissingen met betrekking tot de voorbereidingen op natuurrampen veelal door middel van vragenlijsten onderzocht. Echter, over de dynamiek in de risicoreductiemaatregelen die huishoudens en bedrijven in de loop der tijd nemen en over de factoren die dit beïnvloeden, is nog onvoldoende bekend. Daarnaast is het vooral van belang om inzichten te verkrijgen in de wijze waarop mensen kunnen worden ondersteund bij hun voorbereiding op natuurrampen en klimaatrisico's. Gedragseconomische experimenten kunnen in een gecontroleerde setting analyseren welke financiële prikkels of welk ander beleid, zoals nudges, hieraan kunnen bijdragen.

Ten slotte is het van belang om systemen op te zetten die de financiële vergoeding voor geleden schade regelen, voordat de natuurrampen plaatsvinden. Het is van belang om dergelijke verzekeringssystemen te verankeren in een bredere risicomanagementstrategie, zodat de noodzakelijke klimaatadaptatiemaatregelen worden getroffen. Voorkomen is beter dan genezen, maar het restrisico dient te worden erkend.

Tot slot: vanuit mijn achtergrond als econoom beschouw ik de oorzaken van klimaatverandering als een externaliteit van consumptie- en productieprocessen die broeikasgasemissies veroorzaken en de consequenties van klimaatverandering als economische gevolgen. Natuurrampen ontstaan door weersextremen, maar worden pas als een ramp ervaren wanneer deze in economische schade of ander menselijk lijden resulteren. De economische wetenschap heeft veel te bieden in termen van zowel theorie als methoden voor het bestuderen van de mogelijke gevolgen van klimaatverandering en natuurrampen, alsmede voor het aandragen van oplossingen om deze gevolgen te voorkomen en te verzachten. Zoals blijkt uit mijn rede is het zoeken van verbinding met andere disciplines noodzakelijk om tot een betekenisvolle analyse te komen. De weg vooruit bestaat dus uit samenwerking. Dat is wat deze groep trekvogels illustreert. Ik ben ervan overtuigd dat de Vrije Universiteit met haar strategisch thema Science for Sustainability, en in het bijzonder het Instituut voor Milieuvraagstukken, de juiste expertise en intellectuele omgeving bieden voor de uitvoering van het onderzoek binnen mijn leerstoel Economie van klimaatverandering en natuurrampen.



Dankwoord

Aan het eind van deze rede wil ik graag een aantal mensen bedanken die een belangrijke bijdrage hebben geleverd aan het bereiken van deze mijlpaal in mijn academische carrière. Ten eerste wil ik mijn dank uitspreken aan het college van bestuur van de Vrije Universiteit en het bestuur van de faculteit der Bètawetenschappen voor deze eervolle benoeming en het in mij gestelde vertrouwen. Graag vermeld ik specifiek de steun van Jacob de Boer bij de realisatie van mijn leerstoel.

Zoals ook blijkt uit deze rede ben ik ervan overtuigd dat samenwerking de sleutel is tot vernieuwing van de wetenschap en dat deze vereist is voor maatschappelijk relevant milieuonderzoek. In de afgelopen jaren hebben dan ook veel vruchtbare samenwerkingen plaatsgevonden. In artikelen,

boeken en rapporten heb ik met meer dan 150 verschillende auteurs gewerkt. Elk van deze stukken vormt een bouwsteen van mijn academische vorming. Ik zal nu niet iedereen persoonlijk kunnen bedanken, maar wil hier een aantal personen uitlichten.

Mijn drijfveer om wetenschappelijk onderzoek te verrichten, is ontstaan tijdens mijn scriptie over monetair beleid en financiële crisis die ik heb geschreven onder begeleiding van Philip Marey bij de Universiteit van Maastricht. Hierdoor raakte ik geïnspireerd verder onderzoek uit te voeren naar een andere crisis, de klimaatcrisis en het verzekeren van natuurrampschades. Jeroen van den Bergh en Jeroen Aerts hebben mij overgehaald mijn proefschrift over dit onderwerp te schrijven bij de Vrije Universiteit. Het is een verstandig besluit geweest om naar Amsterdam te gaan. Aan deze twee Jeroens heb ik veel te danken en zij zijn inspirerende voorbeelden voor mij.

Jeroen van den Bergh is mijn academische mentor. Als een zeer betrokken begeleider heeft hij mij de finesses van het wetenschappelijk onderzoek bijgebracht. Zijn enthousiasme en brede en diepgaande kennis over de milieueconomie hebben mijn fascinatie voor dit onderwerp aangewakkerd. Ondanks de omvangrijke absolute afstand tot zijn woonplaats in Barcelona is Jeroen van den Bergh nog altijd nauw betrokken bij de afdeling milieueconomie van het IVM en de VU in het algemeen. Deze betrokkenheid wordt alom gewaardeerd.

Jeroen Aerts heeft mijn interesse in het thema natuurrampen gewekt en mijn ogen geopend voor het belang van interdisciplinair onderzoek. De moderne wetenschap vraagt om veel verschillende vaardigheden: projectacquisitie, de omgang met belanghebbenden, managementvaardigheden, specialisatie van kennis in strategische niches en voortdurende innovatie. Met het bevlogen mentorschap van Jeroen Aerts heb ik mijzelf deze vaardigheden in een korte tijd eigen gemaakt.

Veel collega's maken van het IVM en de afdeling milieueconomie een vruchtbare, maar ook prettige werkomgeving. Ik ben iedereen hiervoor zeer erkentelijk en jullie nemen het mij vast niet kwalijk wanneer ik een paar personen uitlicht. Pieter, bedankt voor onze fijne samenwerking, onder andere op het gebied van onderwijs, waarvan ik veel heb geleerd. Je creativiteit, enthousiasme, betrokkenheid en teamgeest vormen mijns inziens de identiteit van het IVM. Mijn dank gaat uit naar de staf van de afdeling milieueconomie: Richard, Francisco, Mark, Julia, Justin, Bianca, en Onno en Frans als werknemers van de eerste uren, op wie we altijd kunnen rekenen. Mijn bijzondere dank gaat uit naar Marjan en Roy die als voormalige afdelingshoofden het vertrouwen in mij hebben gesteld en de weg vooruit hebben getoond, en nog steeds in grote mate bij de afdeling betrokken zijn.

Philipp, ik waardeer onze samenwerking in ons SKO-project en heb geleerd van je brede visie over onderwijsontwikkeling. Graag bedank ik ook Dave voor zijn betrokkenheid, goede suggesties en ideeën. Mijn dank gaat ook uit naar de intensieve samenwerking met de afdeling water en klimaatrisico's van het IVM, waaronder met Philip, Hans en Ralph en voormalig collega, Laurens Bouwer.

Promovendi spelen een belangrijke rol in mijn onderzoeksprojecten, ook in de projecten die ik vandaag heb gepresenteerd. Afgeronde en lopende PhD-projecten zijn die van Philip, Jennifer, Youbaraj, Paul, Toon, Marvin, Jarl, Peter, Lars, Janstje, Vincent, Max, en Pedja.

Behalve op de VU werk ik ook met plezier op twee andere plaatsen: de Universiteit Utrecht en de Wharton School in de VS. Ik dank de besturen die dit mogelijk hebben gemaakt, maar ook mijn collega's op die plaatsen, voor de prettige samenwerkingen in de afgelopen jaren.

Ik bedank mijn familie, schoonfamilie en vrienden voor hun steun en het accepteren van deze wetenschapper in jullie levens. Papa en mama: het is dankzij jullie steun, toewijding en vorming dat ik hier nu sta. Jullie hebben alles gegeven voor ons, kinderen, en hiervoor ben ik heel dankbaar. Mijn grootste dankbaarheid gaat uit naar Margriet voor haar geduld, liefde en steun.

Ik heb gezegd.

Literatuur

- Aerts, J.C.J.H., Botzen, W.J.W., de Moel, H., Bowman, M. (2013). Cost estimates for flood resilience and protection strategies in New York City. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1294: 1-104.
- Aerts, J.C.J.H., Botzen, W.J.W., Emanuel, K., Lin, N., de Moel, H., Michel-Kerjan, E.O. (2014). Evaluating flood resilience strategies for coastal megacities. *Science*, 344: 473-475.
- Aerts, J.C.J.H., Botzen, W.J.W., Clarke, K.C., Cutter, S., Hall, J., Merz, B., Mysiak, J., Surminski, S., Michel-Kerjan, M., Kunreuther, H. (2017). Integrating human behavior dynamics into climate disaster risk assessment. In review.
- Botzen, W.J.W. (2013). *Managing Extreme Climate Change Risks through Insurance*. Cambridge University Press, Cambridge and New York, pp. 432.
- Botzen, W.J.W., van den Bergh, J.C.J.M. (2008). Insurance against climate change and flooding in the Netherlands: Present, future, and comparison with other countries. *Risk Analysis*, 28(2): 413-426.
- Botzen, W.J.W., van den Bergh, J.C.J.M. (2012a). Risk attitudes to low-probability climate change risks: WTP for flood insurance. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 82(1): 151-166.
- Botzen, W.J.W., van den Bergh, J.C.J.M. (2012b). Monetary valuation of insurance against flood risk under climate change. *International Economic Review*, 53(3): 1005-1025.
- Botzen, W.J.W., van den Bergh, J.C.J.M. (2014). Specifications of social welfare in economic studies of climate policy: Overview of criteria and evaluation of policy insights. *Environmental and Resource Economics*, 58(1): 1-33.
- Botzen, W.J.W., Aerts, J.C.J.H., van den Bergh, J.C.J.M. (2009a). Dependence of flood risk perceptions on socio-economic and objective risk factors. *Water Resources Research*, 45: W10440.
- Botzen, W.J.W., Aerts, J.C.J.H., van den Bergh, J.C.J.M. (2009b). Willingness of homeowners to mitigate climate risk through insurance. *Ecological Economics*, 68(8-9): 2265-2277.
- Botzen, W.J.W., Kunreuther, H., Michel-Kerjan, E. (2015). Divergence between individual perceptions and objective indicators of tail risks: Evidence from floodplain residents in New York City. *Judgment and Decision Making*, 10(4): 365-85.
- Botzen, W.J.W., Michel-Kerjan, E., Kunreuther, H., de Moel, H., Aerts, J.C.J.H. (2016). Political affiliation affects adaptation to climate risks: Evidence from New York City. *Climatic Change*, 138(1): 353-360.
- Botzen, W.J.W., Kunreuther, H., Michel-Kerjan, E. (2017). Protecting against disaster risks: Why insurance and prevention may be complements. Working Paper 2017-05. Risk Management and Decision Processes Center, The Wharton School.
- Botzen, W.J.W., van den Bergh, J.C.J.M., Chichilnisky, G. (2017). Climate policy without intertemporal dictatorship: Chichilnisky Criterion vs. Classical Utilitarianism in DICE. *Climate Change Economics* (In druk).
- Bouwer, L.M. (2011). Have disaster losses increased due to anthropogenic climate change? *Bulletin of The American Meteorological Society*, January: 39-46.
- Bubeck, P., Botzen, W.J.W. (2013). Response to "The necessity for longitudinal studies in risk perception research". *Risk Analysis*, 33(5): 760-762.
- Bubeck, P., Botzen, W.J.W., Kreibich, H., Aerts, J.C.J.H. (2012a). Long-term development and effectiveness of private flood mitigation measures: An analysis for the German part of the river Rhine. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12: 3507-3518.
- Bubeck P., Botzen W.J.W., Aerts J.C.J.H. (2012b). A review of risk perceptions and other factors that influence flood mitigation behavior. *Risk Analysis*, 32: 1481-95.
- Carrera, L., Standardi, G., Bosello, F., Mysiak, J. (2015). Assessing direct and indirect economic impacts of a flood event through the integration of spatial and computable general equilibrium modelling. *Environmental Modelling & Software*, 63: 109-122.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., Shirley, W. L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2): 242-261.

- Deltacommissie (2008). Samen werken met water: Een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst. Bevindingen van de Deltacommissie. <http://www.deltacommissie.com/doc/2008-09-03%20Advies%20Deltacommissie.pdf>
- de Moel, H., Jongman, B., Kreibich, H., Merz, B., Penning-Rowsell, E., Ward, P.J. (2015). Flood risk assessments at different spatial scales. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20(6): 865-890.
- Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Salinas, L., Blöschl, G. (2013). Socio-hydrology: conceptualising human-flood interactions. *Hydrological and Earth System Sciences*, 17: 3295-3303.
- Estrada, F., Botzen, W.J.W., Tol, R. (2015). Economic losses from US hurricanes consistent with an influence from climate change. *Nature Geoscience*, 8: 880-884.
- Estrada, F., Botzen, W.J.W., Tol, R. (2017). A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts. *Nature Climate Change*, 7: 403-406.
- Grossi, P., Kunreuther, H.C. (2005). *Catastrophe Modeling: A New Approach of Managing Risk*. Springer, New York.
- Haer, T., Botzen, W.J.W., Aerts, J.C.J.H. (2016). The effectiveness of flood risk communication strategies and the influence of social networks: Insights from an agent-based model. *Environmental Science and Policy*, 60: 44-52.
- Haer, T., Botzen, W.J.W., de Moel, H., Aerts, J.C.J.H. (2017a). Integrating household risk mitigation behaviour in flood risk analysis: An agent-based model approach. *Risk Analysis*, 37(10): 1977-1992.
- Haer, T., Botzen, W.J.W., Aerts, J.C.J.H. (2017b). Advancing disaster risk policies by integrating dynamic adaptive behavior in flood risk assessments. In review.
- Hudson, P. (2017). The Use of Insurance to Improve Flood Resilience. Proefschrift. Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Hudson, P., Botzen, W.J.W., Aerts, J.C.J.H. (2017). Efficient and equitable flood insurance arrangements for increasing flood risk under climate change and socio-economic development. In review.
- IPCC (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignorand, P.M. Midgley (eds). Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York.
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., and New York.
- Kahneman, D. (2003). Maps of bounded rationality: Psychology for behavioral economics. *The American Economic Review*, 93(5): 1449-1475.
- Kahneman, D. (2011). *Thinking Fast and Slow*. Farrar, Straus and Giroux, New York.
- Kok, M. (2006). Schade na een overstroming: Taak van overheid of eigen verantwoordelijkheid? *Externe Veiligheid*, 4: 15-17.
- Kreibich, H., Thieken, A.H., Petrow, T., Müller, M., Merz, B. (2005). Flood loss reduction of private households due to building precautionary measures: Lessons learned from the Elbe flood in August 2002. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(1): 117-126.
- Kreibich, H., Christenberger, S., Schwarze, R. (2011). Economic motivation of households to undertake private precautionary measures against floods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 309-321.
- Kron, W. (2005). Flood risk = hazard · values · vulnerability. *Water International*, 30: 58-68.
- Kunreuther, H.C. (1996). Mitigating disaster losses through insurance. *Journal of Risk and Uncertainty*, 12: 171-187.

- Kunreuther, H. (2015). The role of insurance in reducing losses from extreme events: The need for public-private partnerships. *The Geneva Papers on Risk and Insurance—Issues and Practice*, 1-22.
- Kunreuther, H.C., Novemsky, N., Kahneman, D. (2001). Making low probabilities useful. *Journal of Risk and Uncertainty*, 23(2): 161-186.
- Kunreuther, H.C., Pauly, M. (2004). Neglecting disaster: Why don't people insure against large losses? *Journal of Risk and Uncertainty*, 28(1): 5-21.
- Leenders, J.K., Zethof, M., De Jong, M.L., Slagter, D. (2015). VNK brengt gevolgen overstromingen in kaart. *Waterhuishouding & Waterbouw*, 4: 30-32.
- Mauritsen, T., Pincus, R. (2017). Committed warming inferred from observations. *Nature Climate Change*, 7: 652-655.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., Thieken, A. (2010). Review article: Assessment of economic flood damage. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10: 1697-1724.
- Mol, J.M., Botzen, W.J.W., Blasch, J.E. (2017). Moral hazard and financial incentives for risk reduction in natural disaster insurance: A laboratory experiment. In voorbereiding.
- Munich Re (2004). Megacities megarisks: Trends and challenges for insurance and risk management, Munchen.
- Munich Re (2017). Natural catastrophes 2016: Analysis, assessments, positions. Topics Geo. 2017 Issue, Munchen.
- National Weather Service (2017). Major Hurricane Harvey - August 25-29. http://www.weather.gov/crp/hurricane_harvey
- New York City (2013). PlaNYC: A stronger more resilient New York. NYC Special Initiative for Rebuilding and Resiliency, New York.
- Nicholls, R.J., Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 328 (5985): 1517-1520.
- Nordhaus, W.D. (1977). Economic growth and climate: The carbon dioxide problem. *The American Economic Review*, 67(1): 341-346.
- Nordhaus, W.D. (1994). *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*. MIT Press, Cambridge.
- Nordhaus, W.D. (2017a). Projections and uncertainties about climate change in an era of minimal climate policies. NBER Working Paper No. 22933.
- Nordhaus, W.D. (2017b). Revisiting the social cost of carbon. *PNAS*, 114(7): 1518-1523.
- Okuyama, Y. (2007). Economic modeling for disaster impact analysis: Past, present, and future. *Economic Systems Research*, 19(2): 115-124.
- Okuyama, Y., Santos, J.R. (2014). Disaster impact and input-output analysis. *Economic Systems Research*, 26(1): 1-12.
- Peters, G.P., Andrew, R.M., Canadell, J.G., Fuss, S., Jackson, R.B., Korsbakken, J.I., Le Quéré, C., Nakicenovic, N. (2017). Key indicators to track current progress and future ambition of the Paris Agreement. *Nature Climate Change*, 7: 118-123.
- Pielke, R.A., Gratz, J., Landsea, C.W., Collins, D., Saunders, M.A., Musulin, R. (2008). Normalized hurricane damage in the United States: 1900-2005. *Natural Hazards Review*, 9: 29-42.
- Poussin, J.K., Botzen, W.J.W., Aerts, J.C.J.H. (2015). Effectiveness of flood damage mitigation measures: Empirical evidence from French flood disasters. *Global Environmental Change*, 31: 74-84.
- Robinson, P., Botzen, W.J.W. (2017). Determinants of probability weighting and probability neglect: The role of emotions, risk perception, and personality in flood insurance demand. In review.
- Rogelj, J., den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi, K., Meinshausen, M. (2016). Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C. *Nature*, 534: 631-639.
- Rose, A., Liao, S.-Y. (2005). Modeling regional economic resilience to disasters: A computable general equilibrium analysis of water service disruptions. *Journal of Regional Science*, 45(1): 75-112.
- Rose, A., Sue Wing, I., Wei, D., Wein, A. (2016). Economic impacts of a California tsunami. *Natural Hazards Review*, 17(2): -1-1.

- Rose, A., Wei, D. (2013). Estimating the economic consequences of a port shutdown: The special role of resilience. *Economic Systems Research*, 25(2): 212-232.
- Sanderson, B.M., Knutti, R. (2017). Delays in US mitigation could rule out Paris targets. *Nature Climate Change*, 7: 92-94.
- Siegrist, M. (2013). The necessity for longitudinal studies in risk perception research. *Risk Analysis*, 33(1): 50-51.
- Stern, N. (2008). The economics of climate change. *The American Economic Review*, 98(2): 1-37.
- Stern, N. (2013). The structure of economic modeling of the potential impacts of climate change: Grafting gross underestimation of risk onto already narrow science models. *Journal of Economic Literature*, 51(3): 838-859.
- Surminski, S., Aerts, J.C.J.H., Botzen, W.J.W. Hudson, P., Mysiak, J., Perez-Blanco, D. (2015). Reflections on the current debate on how to link flood insurance and disaster risk reduction in the European Union. *Natural Hazards*, 79(3): 1451-1479.
- Thaler, R., Sunstein, C.R. (2008). *Nudge: Improving Decisions about Health, Wealth, and Happiness*. Yale University Press, New Haven.
- Tol, R. (2017). Economic impacts of climate change. *Review of Environmental Economics and Policy* (In druk).
- van den Bergh, J.C.J.M., Botzen, W.J.W. (2014). A lower bound to the social cost of CO2 emissions. *Nature Climate Change*, 4: 253-258.
- van den Bergh, J.C.J.M., Botzen, W.J.W. (2015). Monetary valuation of the social cost of greenhouse gas emissions. *Ecological Economics*, 114: 33-46.
- Wind, H.G., Nierop, T.M., de Blois, C.J., Kok, J.L. (1999). Analysis of flood damages from the 1993 and 1995 Meuse floods. *Water Resources Research*, 35: 3459-3465.
- WMO (2017). The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2016. *Greenhouse Gas Bulletin*, 13: 1-8. World Meteorological Organization (WMO).
- Zhao, L., Lee, X., Smith, R.B., Oleson, K. (2014). Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 511: 216-219.